



УДК 556.556

Особенности переноса энергии по результатам спектрального анализа температурных данных

С. В. Ловцов (lsv@api.isu.ru)

И. А. Портыанская (iportyanskaya@mail.ru)

А. Э. Растегин (rast@api.isu.ru)

Аннотация¹. Обсуждаются некоторые особенности распространения энергии возмущений сквозь водную толщу оз. Байкал. Выводы получены в результате анализа температурных временных рядов, измеренных в южной части озера. Наблюдения проводились вблизи постановки Байкальского нейтринного телескопа в районе мыса Ивановский. Для изучения процессов переноса энергии возмущений мы сравниваем интегральные спектральные характеристики и спектральные характеристики на выделенных частотах на различных глубинах и на буйковых станциях, размещенных в разных точках озера. Кроме того, мы оцениваем типичные времена и скорости распространения области возмущений через водную толщу.

Ключевые слова: перенос энергии, спектральный анализ, пространственно-временные масштабы, стратификация, гомотермия.

Введение

Динамика естественных водоемов представляет один из ключевых разделов при рассмотрении процессов, происходящих в гидросфере. Исследования гидрофизических и биогеохимических процессов в оз. Байкал представляет особый интерес в силу его уникальных свойств, таких как значительная глубина, слабая активность процессов горизонтального и вертикального тепло- и водообмена, что служит причиной инерционности его физико-химических характеристик [10].

Благодаря повсеместному присутствию градиента температуры в силу стратификации, температурные вариации можно считать маркером динамических процессов, протекающих в водной толще, таких как массо- и теплообмен. Так, например, вариации температуры на фоне ее градиентного поведения в присутствии молекулярной теплопроводности могут свидетельствовать как о наличии массопереноса, так и о присутствии волновых процессов с периодами от долей секунд до нескольких суток и длинами волн от миллиметров до десятков и сотен километров. Поэтому вол-

¹ Авторы выражают признательность сотрудникам коллаборации «Байкал» и Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (Швейцария) за предоставленные экспериментальные данные. Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. ГК № 02.740.11.0018.

новые процессы можно рассматривать как своего рода «каналы» энергообмена между глубинными и поверхностными слоями и между удаленными областями водоемов. На сегодняшний день в литературе предложено множество механизмов, объясняющих причины их возникновения [11]. Высокие значения температуропроводности показывают присутствие конвективных процессов, а вариации температуры служат инструментом для их исследования [3].

Для получения серий температурных данных проводится долговременный мониторинг процессов с помощью приборов, размещенных на стационарных буйковых станциях. Непрерывный мониторинг температурного режима по всему диапазону глубин проводится начиная с 1999 г. и ведется по настоящее время.

Измерения температурных вариаций осуществляются на базе Байкальского нейтринного полигона НИИПФ Иркутского государственного университета в районе 106-го километра Кругобайкальской железной дороги на Южном Байкале в рамках Байкальского Нейтринного Проекта [9]. Наблюдения осуществляются с помощью высокоточных глубоководных измерителей температуры воды (термисторов) TR-1000, TR-1050, TR-1060, закрепленных на нескольких глубинах по всей толще воды в точках постановки (см. рис. 1). Разрешение по температуре для этих приборов составляет $0,001\text{--}0,0001\text{ }^{\circ}\text{C}$, они преимущественно размещаются на больших глубинах, где вариации температуры не велики. На меньших глубинах используются более грубые измерители температуры VEMCO (разрешение $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$). Частота опроса датчиков варьируется от одного раза в 15 с до одного раза в 10 мин.

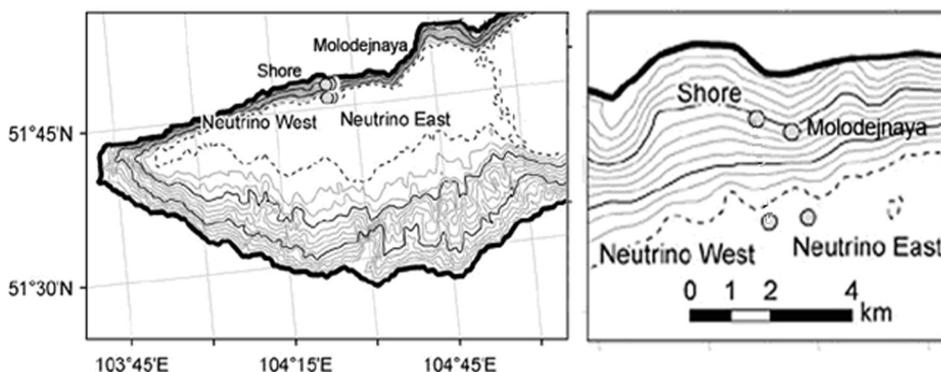


Рис. 1. Расположение буйковых станций для долговременного температурного мониторинга

Согласно полученным данным можно выделить три диапазона глубин, качественно различающихся по своему температурному режиму: 0–300 м – зона термоклина, обладающая повышенной интенсивностью возмущений и интервалом изменения температур в течение года от 0 до $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, в зависи-

мости от глубины; 300–1250 м – глубинная зона, в которой температура воды медленно убывает с глубиной независимо от времени года; 1250–1366 м – придонная зона, в которой температурный режим практически не связан с процессами в глубинной зоне, но здесь наблюдаются значительные сохраняющиеся длительное время вариации температуры [6].

Данные непрерывного мониторинга температурного режима представляют собой дискретные временные ряды, эффективным методом исследования которых является спектральный анализ [8]. Благодаря такому подходу можно исследовать процессы переноса энергии, волновые явления, оценивать их масштаб и скорость развития.

Спектральная плотность как энергетическая характеристика динамических процессов

Для выявления различных типов движений водной среды используется спектральный анализ временных рядов.

Мы будем использовать оконные преобразования, поскольку различные периоды времени (зима, лето, периоды гомотермий) характеризуются разными динамическими процессами, отображающимися в спектральном наполнении. Величина окна выбиралась таким образом, чтобы охватить интервал развития основных волновых процессов в соответствующий период.

Основным элементом спектрального анализа является Фурье-образ исследуемой величины, в нашем случае – температуры:

$$I(\omega | t_0, z) = \int_{t_0 - \frac{\Delta t}{2}}^{t_0 + \frac{\Delta t}{2}} e^{i\omega\tau} T(\tau, z) d\tau, \quad (1)$$

где t_0 – является центром окна.

Спектральная функция $I(\omega)$, определяемая преобразованием Фурье, позволяет определить амплитудный спектр исследуемого процесса. В дополнение к ней ключевым показателем динамики процесса является спектральная плотность корреляционной функции $S(\omega)$, определяющая энергетический спектр.

$$S(\omega) = \int_{t_0 - \frac{\Delta t}{2}}^{t_0 + \frac{\Delta t}{2}} e^{i\omega\tau} R(\tau | t_0, z) d\tau, \quad (2)$$

где корреляционная функция температуры определена как

$$R(\tau | t_0, z) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0 - \frac{\Delta t}{2}}^{t_0 + \frac{\Delta t}{2}} T(t + \tau, z) T(t, z) dt. \quad (3)$$

Согласно своему определению спектральная плотность

$$S(\omega) \sim |I(\omega)|^2 \quad (4)$$

Чтобы выявить взаимосвязи возмущений на разных глубинах в разные времена года в целом, мы будем использовать интегральные характеристики, а именно величину $J(t, h)$, равную интегралу спектральной плотности и служащую показателем величины энергии возмущения, согласно теореме Парсевала [8]:

$$J(t_0, h) = \int_{t_0 - \frac{\Delta t}{2}}^{t_0 + \frac{\Delta t}{2}} S(\omega, h) d\omega \quad (5)$$

В расчетах интеграл спектральной плотности $J(t_0, h)$ можно аппроксимировать интегральной суммой по всевозможным частотам. Верхний предел определяется частотой опроса термисторов, нижний выбран так, чтобы влияние сезонного развития температурного профиля было исключено.

Результаты анализа спектральной плотности температурных вариаций

В естественных водоемах наблюдается присутствие определенного набора динамических процессов. Эти процессы описываются своим набором характерных частот. Так, в оз. Байкал наблюдаются сейши с периодами 278, 140, 93 и 70 мин (одно, двух-, трех- и четырехузловая), приливные процессы с периодом 12 ч, инерционные процессы с периодами 15 и 7 ч, синоптические возбуждения с периодами от 2 до 5 сут. [4]. Характерные периоды можно увидеть как максимумы на спектрах корреляционной функции температуры. Турбулентный режим характеризуется широким интервалом связанных спектральных возмущений, амплитуда которых подчиняется законам Колмогорова [5].

В силу того, что вариации температуры отражают динамику течений и волновых процессов, спектры корреляционной функции температуры по своему характеру близки к спектрам течений. Так же как и в спектрах течений [2], в спектрах корреляционной функции температуры наблюдаются ярко выраженные максимумы в области инерционной частоты (~15 ч) и на частоте её первого обертона (~7 ч), регулярно наблюдаются максимумы на частоте одноузловой сейши (~5 ч) (рис.2). Инерционные колебания присутствуют в течение всего года по всему диапазону глубин.

Согласно проведенному анализу необходимо отметить, что вариации корреляционной функции температуры на синоптических и сейшевых частотах имеют различный характер. На рис. 3 приведены $S(\omega)$ для набора характерных частот как функции времени на различных горизонтах в период с марта 2004 по март 2005 гг.

Соответствующая каждому горизонту кривая отнормирована таким образом, чтобы максимальное значение было равным единице. По максимумам колебаний на сейшевых частотах можно провести ломаную, состоящую из двух отрезков. Первый отрезок проводится через верхние горизонты 15, 50, 100, 150 м. Второй отрезок ломаной значительно большего наклона приходится на период осенней гомотермии. Видно, что возмущения довольно быстро охватывают весь слой 200–1000 м.

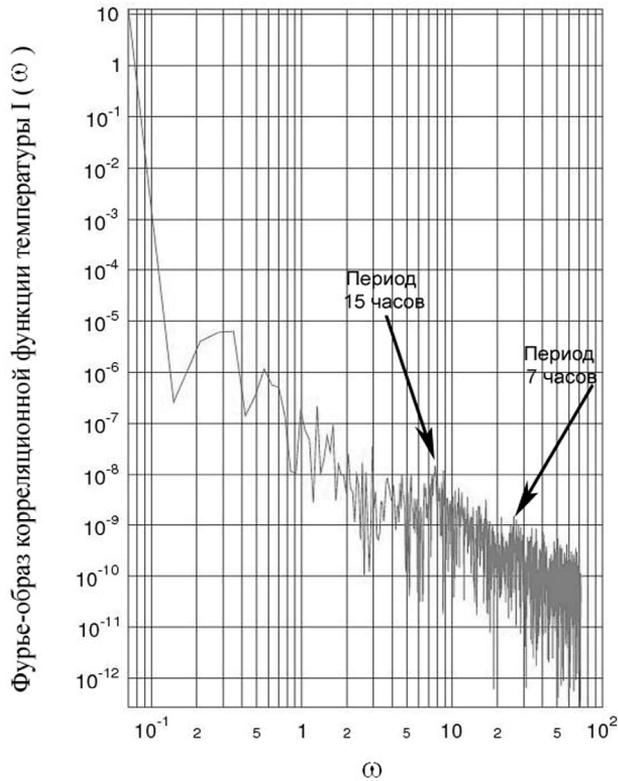


Рис. 2. Фурье-образ корреляционной функции температуры в зависимости от частоты в дважды логарифмическом масштабе

Сравнивая положения условных «центров масс» спектральных возмущений на разных глубинах, можно оценить скорость погружения возмущения. Полученная оценка составляет $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ м/с. Важно отметить, что характер распространения возмущения по глубине наблюдается не только для сейшевых частот, но и в целом для широкого частотного интервала. Более того, по мере смещения наблюдается уширение частотного пакета. В работе [1] были описаны результаты моделирования пространственно-временных распределений эффективных коэффициентов турбулентной теплопроводности и массопереноса. Было показано, что в периоды, близкие к гомотермиям, пространственно развивается область с высокими значениями теплопроводности (область выраженной турбулентности). Полученное значение скорости распространения возмущения качественно коррелирует со скоростью расширения области повышенной теплопроводности, полученной в работе [1]. Тот факт, что распространение возмущения по вертикали в периоды близкие к гомотермии наблюдается в широком интервале частот и интервал этот уширяется по мере смещения, может быть проинтерпретирован как подтверждение не волновой, а конвективной природы распространения энергии в эти периоды.

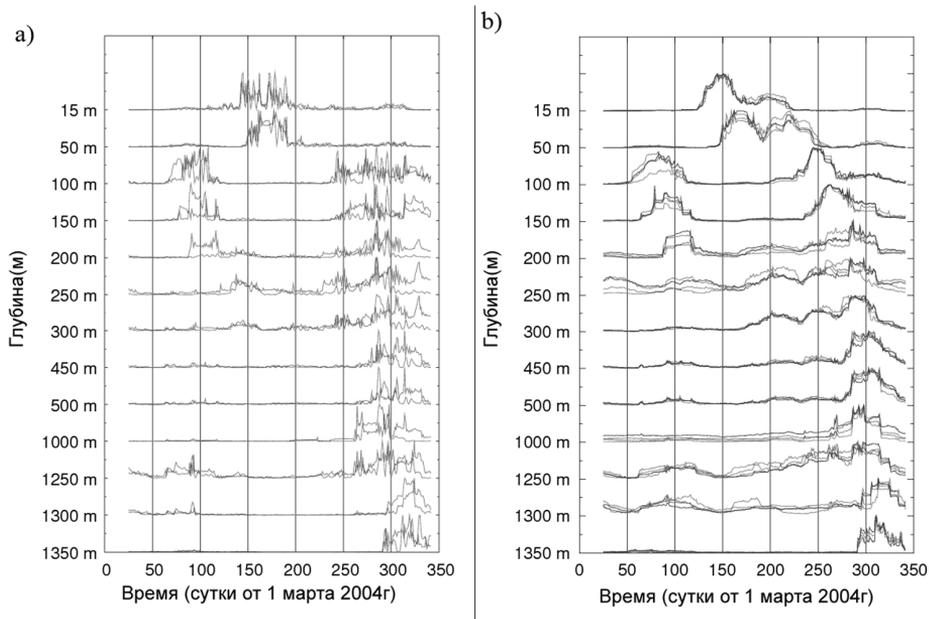


Рис. 3. Внутригодовое распределение спектральной плотности корреляционной функции температуры на различных глубинах: а) для синоптических частот, б) для сейшевых частот

Если сравнить зависимости $S(\omega)$, имеющие место на одной глубине в разные сезоны, то четко обнаруживается интенсификация возмущений в летний период. Это вполне прогнозируемое поведение особенно заметно в слое термоклина, что свидетельствует об активизации динамических процессов на поверхности за счет напряжения, давления и потоков плавучести. На средних глубинах со слабой стратификацией указанное явление просматривается не столь отчетливо. Данный факт может быть связан как с уменьшением доли передаваемой туда поверхностной энергии, так и со значительно более низкими градиентами температур. В придонной области основным источником возмущений служит топографическое порождение.

Изменения интегральной характеристики $J(t_0, h)$ в течение 2000 г. на разных глубинах показаны на рис. 4. Размер окна составлял 15 сут. По порядку величины интегральные характеристики изменяются от 10^{-3} на верхних глубинах до 10^{-7} в придонных слоях. На графике представлены значения, нормированные на величину максимального значения на каждой глубине соответственно.

Ситуация, наблюдаемая для интегральных показателей схожа с аналогичной картиной по выделенным частотам, приведенной на рис. 3. Оценки направления распространения области возмущений и время их проникновения вглубь оказались следующими. В летний период потоки направлены от поверхностного слоя вниз, причем на глубину 50 м энергия поверхностных возбуждений передается в течение месяца. В периоды гомотермии возбуждения в верхних слоях также имели место, но их суммарная интен-

сивность была значительно ниже. При этом потоки энергии были направлены также вниз, а характерные времена распространения значительных возмущений составляли около двух недель.

На глубинах от 100 до 500 м наибольшие значения интегральной характеристики имели место в периоды весенней и осенней гомотермии. Во время осенней гомотермии суммарная интенсивность возмущений была выше, причем с увеличением глубины указанная тенденция становится все более отчетливой. Одним из возможных объяснений этого может быть эффект накопления энергии возмущений, передающихся из вышележащих слоев чрезвычайно медленно действующими механизмами переноса (расширения области турбулентности).

Поскольку горизонтальный градиент температур мал, естественно было ожидать похожее поведение спектральной плотности на разных буйковых станциях. Тем не менее, на глубине 50 м наибольшая интенсивность возмущений на станции «Neutrino West» наблюдается со смещением в месяц относительно времени наблюдения максимума интенсивности на станциях «Shore», «Neutrino East» (рис. 5, *a*).

Одновременно с этим необходимо отметить, в момент максимальных возмущений на станциях «Shore», «Neutrino East» в точке «Neutrino West» наблюдается максимум на другом горизонте – 75 м (рис. 5, *b*).

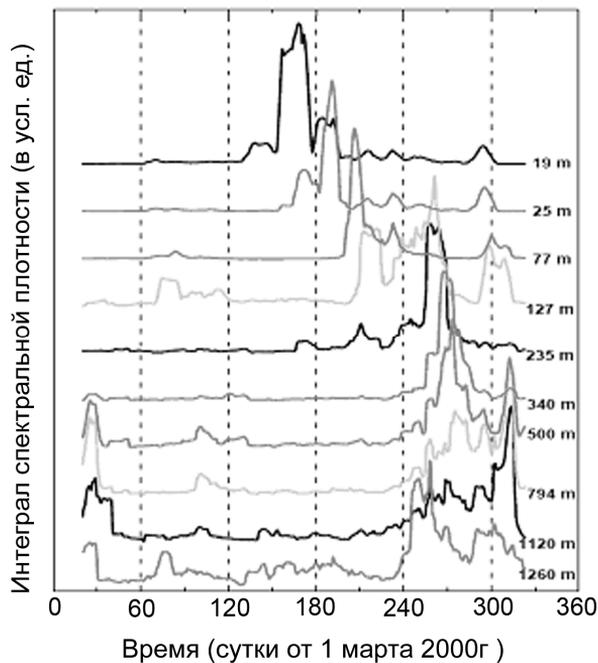


Рис. 4. Зависимость интеграла спектральной плотности (в относительных единицах) от времени на различных горизонтах, зафиксированных на буйковой станции «Neutrino East»

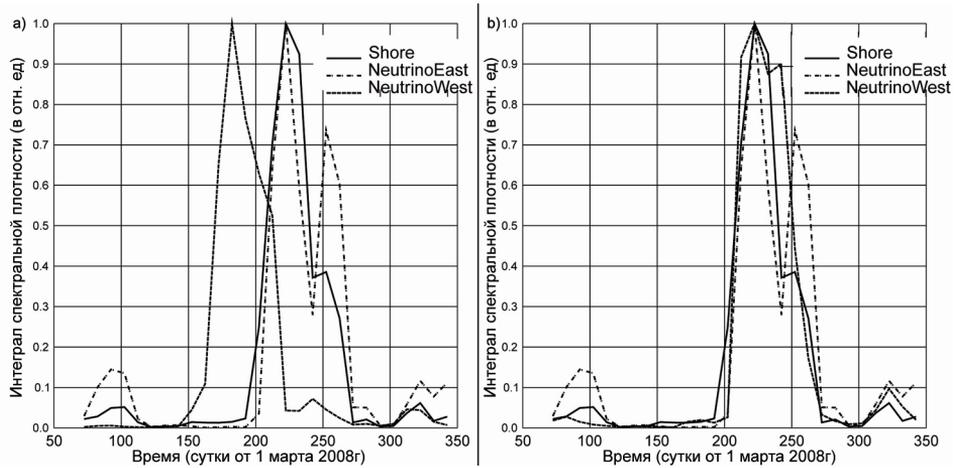


Рис. 5. Зависимость интеграла спектральной плотности (в относительных единицах) от времен: а – на буйковых станциях «Neutrino East», «Neutrino West», «Shore» на глубине 50 м; б – на буйковых станциях «Neutrino East» на глубине 50 м, на станции «Neutrino West» на глубине 75 м

Буйковые станции «Neutrino East» и «Neutrino West» расположены на расстоянии 3,7 км от береговой линии, на расстоянии ~ 1 км друг от друга. Удаление от берега буйковой станции «Shore» составляет $\sim 1,2$ км, расстояние от станций «Neutrino East» и «Neutrino West» составляет $\sim 1,5$ км.

Факт смещения точки максимума возмущений относительно точки наблюдения можно интерпретировать как свидетельство распространения возмущенной области по горизонтали со скоростью порядка 1 см/мин.

Для выявления относительных масштабов активности на разных глубинах удобно рассмотреть распределение максимальных значений спектральной плотности корреляционной функции по глубине на фиксированных частотах.

Максимальные значения спектральной плотности корреляционной функции на инерциальной частоте, по данным 2006–2007 и 2007–2008 гг., для каждого из горизонтов показаны на рис. 6.

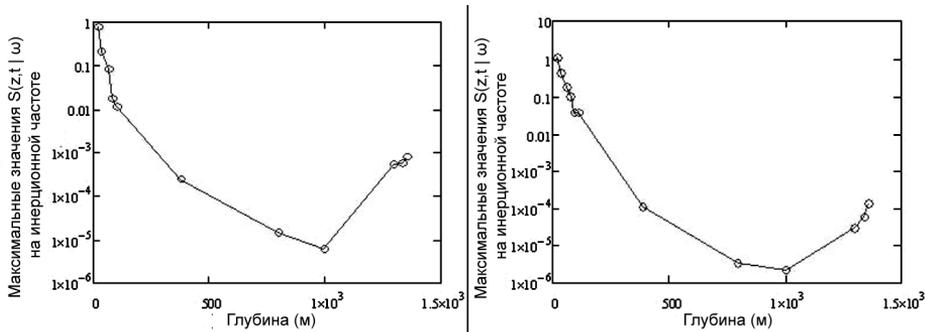


Рис. 6. Максимальные значения $S(z, t | \omega)$ на горизонтах установки термисторов в интервалы наблюдений 2006–2007 и 2007–2008 гг.

Согласно полученным распределениям можно отметить ежегодную заметную интенсификацию возмущений вблизи дна. Это является дополнительным подтверждением хорошо известного факта активизации динамики вблизи твердой границы, что свидетельствует о том, что в придонной области присутствуют движения жидкости специфического вида, не характерного для основной водной толщи [7].

Заключение

Проведенный спектральный анализ позволил оценить изменение по времени картины энергетического баланса: на глубинах до 100 м наибольшая интенсивность наблюдается в летний период. Типичное время распространения области возмущений через приповерхностную зону порядка месяца. На больших глубинах заметные возмущения наблюдаются в периоды, близкие по времени к моментам гомотермий. При этом осенняя динамика отличается значительно большей интенсивностью.

Наблюдается общая корреляция между результатами моделирования коэффициента турбулентной теплопроводности и спектральным анализом области свободной конвекции.

Значения характеристик, как интегральной так и по отдельным частотам, в пике, связанном с осенней гомотермией, более чем на порядок превосходят значения, типичные для периода весенней гомотермии. При этом в предшествующие осенней гомотермии месяц-полтора отчетливо видна постепенная интенсификация динамики водной среды. Вместе с тем хорошо развившиеся уже возмущения проникают в нижележащие слои достаточно быстро, за время порядка нескольких суток.

Общее поведение интегральных характеристик повторяет основные черты соответствующих характеристик по отдельно взятым частотам.

Список литературы

1. Результаты моделирования эволюции температурного режима верхних слоев оз. Байкал по данным экспериментов 2000–2001 гг., 2004–2005 гг. / Н. М. Буднев [и др.] // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. – 2008. – Т. 1, № 1. – С. 76–83.
2. *Верболов В. И.* Течения и водообмен в Байкале / В. И. Верболов // Водные ресурсы. – Т. 23, № 4. – С. 413–423.
3. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен : в 2 кн. / Б. Гебхарт, И. Джалурия, Р. Махаджан, Б. Саммакия. – М. : Мир, 1991. – 678 с.
4. Самоорганизация и саморегуляция природных систем (модель, метод и основы теории D-SELF) / А. Г. Иванов-Ростовцев, Л. Г. Колотило, Ю. Ф. Тарасюк, П. П. Шерстянкин ; под ред. К. Я. Кондратьева. – СПб. : Рус. геогр. о-во, 2001. – С. 171–180.
5. *Монин А. С.* Океанская турбулентность / А. С. Монин, Р. В. Озмидов. – Л. : Гидрометеиздат, 1981. – 320 с.
6. *Шимараев М. Н.* Элементы теплового режима озера Байкал / М. Н. Шимараев ; отв. ред. А. Н. Афанасьев. – Новосибирск : Наука, 1977. – 150 с.
7. *Lorke A.* Shear-induced convective mixing in bottom boundary layers on slopes / A. Lorke, F. Peeters, A. Wuest // *Limnol. Oceanogr.* – 2005. – Vol. 50, N 5. – P. 1612–1619.

8. *Percival D. B.* Spectral analysis for physical applications / D. B. Percival, A. T. Walden. – Cambridge University Press, 1993. – 584 p.

9. Lake Baikal deepwater renewal mystery solved. / M. Schmid, N. M. Budnev, N. G. Granin, M. Sturm, M. Schurter, A. Wuest // *Geophys. Res. Lett.* – 2008. – Vol. 35. – L09605. – doi:10.1029/2008GL033223.

10. Physical limnology of Lake Baikal: a review / M. N. Shimaraev, V. I. Verbolov, N. G. Granin, P. P. Sherstyankin // *Baikal International Center for Ecological Research.* – Print. N 2. – Irkutsk-Okayama, 1994. – 81 p.

11. *Thorpe S. A.* The Turbulent Ocean / S. A. Thorpe. – Cambridge University Press, 2005. – 439 p.

Features of Energy Transfer via Spectral Analysis of Water Temperature Data

S. V. Lovtsov, I. A. Portyanskaya, A. E. Rastegin

Annotation. In this work several features of propagation of excitations energy through a water thickness of Lake Baikal are investigated. The conclusions were made by analyzing the temperature series measured in the south basin of the lake. The observations are being carried out near Baikal Neutrino Telescope in the area of Cape Ivanovskii. The energy transfer was examined by a comparative consideration of integral spectral characteristics and spectral characteristics on fixed frequencies. We have compared spectral at various depths and moorings. A velocity of vertical energy transfer during different periods of the year was also estimated.

Key words: energy transfer, spectral analysis, space-time scales.

Ловцов Сергей Владимирович
кандидат физико-математических наук, доцент
Иркутский государственный университет
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
тел.: (3952) 52–12–57

Lovtsov Sergey Vladimirovich,
Ph. D. in Physics and Mathematics,
Associate Professor
Irkutsk State University,
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003
tel: (3952) 52–12–57

Портянская Инна Александровна
старший преподаватель
Иркутский государственный университет
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1,
тел.: (3952) 52–12–57

Portyanskaya Inna Aleksandrovna
Senior Lecturer
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003
tel: (3952) 52–12–57

Растегин Алексей Эдуардович
кандидат физико-математических наук, доцент
Иркутский государственный университет
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
тел.: (3952) 52–12–57

Rastegin Alexey Eduardovich
Ph. D. in Physics and Mathematics,
Associate Professor
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003
tel: (3952) 52–12–57